第46卷 第2期
2023年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 2
Feb. 2023

1980—2020年渭河流域高温热浪时空变化特征

邓甜甜， 耿广坡， 杨 睿， 张 保

（西安科技大学测绘科学与技术学院，陕西 西安 710054）

摘 要： 基于1980—2020年渭河流域24个气象站点逐日最高气温数据，利用Sen+Mann-Kendall趋势分析方法，研究了渭河流域近40 a来高温热浪的时空变化特征。结果表明：（1）渭河流域高温日数多年平均值为3.54 d，且以约1 d·(10a)$^{-1}$的速率呈极显著增加趋势，渭河流域年均高温日数呈现西北少、东南多的空间分布特征，以关中平原站点高温日数增加趋势最为显著。（2）高温初日最早时间在4月下旬，高温终日最晚时间在9月上旬，渭河流域大部分站点高温初日呈显著性提前，提前天数约3~5 d·(10a)$^{-1}$，接近一半的站点高温终日呈显著性推迟，推迟天数约3 d·(10a)$^{-1}$，说明渭河流域受到高温影响的总时间变长了。（3）渭河流域重度高温热浪发生次数占比为10.32%，说明每10次事件中至少有1次是重度高温热浪，不同等级高温热浪频次较高的站点和持续时间较长的站点都位于渭河流域东南部的关中平原，说明关中平原是渭河流域高温热浪的重心。（4）不同时段高温热浪强度整体呈显著上升趋势，未来强度可能还会进一步加剧，这对渭河流域人类健康和工农业生产等造成严重威胁，需要引起相关部门足够重视。研究结果可为渭河流域减轻高温热浪灾害提供参考。

关 键 词： 高温热浪；趋势分析；时空变化；强度；渭河流域

文章编号： 1000-6060(2023)02-0211-11(0211~0221)

IPCC第六次报告指出，2011—2020年全球地表温度比工业革命时期上升了1.09 ℃，未来20 a全球温度升高将超过1.5 ℃[1]。在气候变化背景下，高温热浪事件的发生频次更高，波及范围更广[2-3]。作为一种极端天气，高温热浪不仅威胁到人们的生命健康，而且还会对工农业、生态环境以及社会的稳定发展造成极大危害。2003年夏季强高温热浪事件席卷欧洲导致超3×10^{4}人丧生，农业损失超过1×10^{14} USD[4-5]。2013年夏季中国长江流域中下游发生罕见的极端高温事件，导致上千人中暑，对工业、农业生产造成严重影响[6-7]。因此，科学认识高温热浪的发生规律对于减轻其不利影响具有重要作用，受到国内外学者的广泛关注[8-9]。

高温热浪作为一种气象灾害其具体标准主要依据高温对人体产生影响或危害的程度而制定。目前国际上还没有一个统一的高温热浪标准，国内外研究中高温热浪识别方法可大致分为三类：（1）绝对阈值法，通过日最高气温超过某一温度值来判定；（2）相对阈值法，通过日最高气温超过某一分位数的温度来判定；（3）热浪导致中暑或死亡的人数[10]。其中，前两种方法应用最为广泛。第一种方法多适用于区域尺度，如邢佩等[11]在华北地区利用绝对阈值法定义日最高气温≥35 ℃为1个高温日，并把高温热浪划分为3个等级，结果发现华北地区年高温日数整体呈增加趋势，高、中、低不同等级高温热浪频次的空间分布特征相近，高频次区域均集中于内蒙古西部、山西西南部和河北南部。姜荣等[12]定义≥35 ℃为高温天气，连续5 d≥35 ℃为一次高温热浪过程，发现上海市1960—2013年极端高温天气呈增强趋势，尤其是2013年高温日数和高温热浪事件发生

收稿日期： 2022-05-11； **修订日期：** 2022-06-08

基金项目： 国家自然科学基金项目（41807503）；陕西省教育厅科研计划项目（21JK0771）；西安科技大学博士启动金项目（2017QDJ030）；陕西省软科学研究计划（2022KRM034）资助

作者简介： 邓甜甜（1997-），女，硕士研究生，主要从事高温干旱监测及其影响评价等方面的研究. E-mail: dengt_t@163.com

通讯作者： 耿广坡（1986-），男，副教授，主要从事自然灾害监测和风险评估研究等方面的研究. E-mail: gengguangpo@xust.edu.cn

频次均达到最大值。第二种方法适用于全球和国家等大的空间尺度，如贾佳等[13]将95%分位数的气温作为高温阈值，发现中国区域平均高温日数呈现先减后增的变化趋势，且西北地区易发生弱高温热浪事件。Keellings等[14]利用气温超过95%分位数阈值的方法定义高温热浪，结果显示1981—2018年美国各地的热浪显著增加，且发现热浪强度和面积以及持续时间和面积都成显著正相关，表明热浪区域越大，其强度越强，持续时间越长。目前，国内高温热浪的研究取得积极进展，但研究区域主要集中在国家尺度和南方地区、华北地区等区域尺度[7-8,15]，在全球气候变暖背景下，西北地区升温非常明显，而在西北地区流域尺度的高温热浪研究还相对较少，高温热浪发生的时空规律还不清晰，量化指标也不够充足。

渭河流域是黄河流域的最大子流域，地理条件得天独厚，气候四季分明，是中国传统农业生产区域，其东南部关中平原更是中国重要的粮食生产基地和人口聚居区[16]，但因其处于黄土高原干旱区与湿润区过渡地带，是气候变化的敏感区和生态环境脆弱区，随着全球气候变暖不断加剧，渭河流域高温热浪易发。故本文选择渭河流域为研究区，利用高温日数、高温初终日、持续时间、高温热浪频次和强度等指标，综合分析近40 a来渭河流域高温热浪的时空变化特征，研究结果有助于科学辨识高温热浪的流域性特征，可为渭河流域实施高温灾害防御和减轻灾害影响提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

渭河流域处于103°57′~110°16′E，33°42′~37°24′N之间，横跨陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区三省，总面积约为1.348×10^5 km^2。其中甘肃、陕西和宁夏分别占渭河流域面积的44.1%、49.8%和6.1%。渭河流域总体呈西部高东部低的地势，其中西部地区主要为黄土丘陵沟壑区，东南部主要为关中平原区，北部为黄土高原，南部为秦岭山区(图1)。渭河流域属于典型的大陆性季风气候，春季气温波动较大降水较少，夏季炎热多雨，秋季凉爽湿润降水较多，冬季寒冷干燥，年平均气温为7.8~13.5 ℃，年平均降水量450~700 mm。在气候变化背景下，渭河流域升温明显，高温热浪等气象灾害多发生[17-18]。

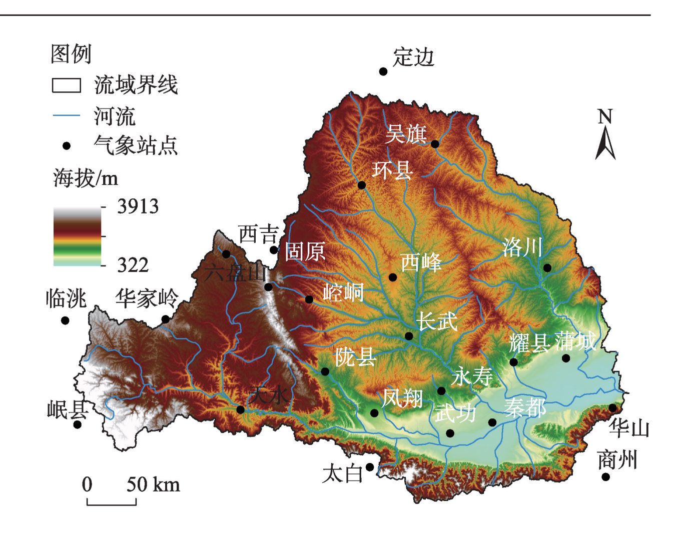


图1 渭河流域及其气象站点分布

Fig. 1 Distribution map of Weihe River Basin and its meteorological stations

1.2 数据来源及处理

本研究中使用的数据来自中国气象局国家气象信息中心发布的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)，研究时段为1980—2020年，该数据集经过了严格的质量控制。根据站点分布和研究时段数据记录完整性，共选取渭河流域及其周边24个气象站点，其中陕西省14个，甘肃省7个，宁夏回族自治区3个(表1)。

1.3 研究方法

1.3.1 高温日与高温初终日 本文参考国家气象局的规定和《气象灾害预警信号图标GB/T 27962-2011》，将日最高气温≥35 ℃作为1个高温日。高温初日指每年第一次出现最高气温≥35 ℃的日期，高温终日指每年最后一次出现最高气温≥35 ℃的日期[11]。

1.3.2 高温热浪等级 对于高温热浪分级标准，本文参照相关研究，将高温热浪分为轻度高温热浪、中度高温热浪、重度高温热浪3个等级[11,14,19]，判别标准如表2所示。

1.3.3 高温热浪强度 高温热浪研究中，不仅要反映高温热浪的次数，还要表征高温热浪的强度。其中高温热浪事件的持续时间与高温热浪过程中日最高气温都是表征高温热浪强度的指标。为了更好地表征高温热浪，将高温热浪过程中日最高气温≥35 ℃的累积数定义为高温热浪强度。计算公式如下：

表1 渭河流域选取气象站点基本信息

Tab. 1 Basic information of selected meteorological stations in the Weihe River Basin

所属省份	站点名	站点编号	所属省份	站点名	站点编号
陕西省	定边	53725	陕西省	秦都	57048
陕西省	吴旗	53738	陕西省	商州	57143
陕西省	长武	53929	甘肃省	临洮	52986
陕西省	洛川	53942	甘肃省	华家岭	52996
陕西省	蒲城	53948	甘肃省	西峰	53923
陕西省	陇县	57003	甘肃省	环县	53821
陕西省	凤翔	57025	甘肃省	崆峒	53915
陕西省	太白	57028	甘肃省	岷县	56093
陕西省	永寿	57030	甘肃省	天水	57014
陕西省	武功	57034	宁夏回族自治区	固原	53817
陕西省	耀县	57037	宁夏回族自治区	西吉	53903
陕西省	华山	57046	宁夏回族自治区	六盘山	53910

表2 高温热浪等级判别标准

Tab. 2 Judgment standard of high temperature and heat wave grade

等级	统计标准
轻度高温热浪	连续3~4 d出现≥35 ℃高温，或连续2 d出现≥35 ℃高温，且其中1 d出现≥38 ℃
中度高温热浪	连续5~7 d出现≥35 ℃高温，或连续2 d出现≥38 ℃高温
重度高温热浪	连续8 d以上出现≥35 ℃高温，或连续3 d出现≥38 ℃高温

$$Q = \frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n}(\bar{T} - 35) \times d_i \qquad (1)$$

式中：Q为高温热浪强度；n为某年该站出现的总热浪频次；$\bar{T}$为某年第i次热浪过程的平均日最高气温(℃)；d_i为第i次热浪过程的持续日数[20]。

1.3.4 Sen+Mann-Kendall趋势分析 本文采用Sen趋势度与Mann-Kendall法相结合的方法对高温日和高温热浪事件的时空变化特征进行了分析。Sen趋势度计算的是序列斜率对的中值，抗噪性强，但不能判断序列趋势的显著性。假设有n个样本x_i, …, x_n的时间序列，对于所有i,j≤n，且$i \neq j$，x_i和x_j的分布是不同的。Sen趋势度的计算公式为：

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right),\ \forall j > i \qquad (2)$$

式中：β为该序列的平均变化率以及事件序列的趋势。当$\beta>0$时，序列呈上升趋势；当$\beta=0$时，序列趋势不明显；当$\beta<0$时，序列呈下降趋势；Median为取中值函数；x_i和x_j为样本时间序列的值；i和j为1, …, n的整数。

Mann-Kendall(M-K)趋势分析是一种非参数检验方法，用来检验基于时间序列的上升或下降趋势。其优点在于检验的样本不需要遵循某一特定的分布，且比较不容易受异常值的干扰。现已被广泛地应用于分析降水、径流和气温等要素时间序列的变化情况。其原理如下：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{Sgn}(x_j - x_i) \qquad (3)$$

$$\mathrm{Sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \qquad (4)$$

式中：S为检验统计量，呈正态分布，均值为0；Sgn为秩序列；方差为$\mathrm{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$。当$n$≥10时，标准正态系统变量($Z$)可以通过以下公式计算：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S > 1 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S < 1 \end{cases} \qquad (5)$$

对于$Z>0$时，序列呈上升趋势；$Z<0$时，序列呈下降趋势；且Z的绝对值在大于等于1.96、2.58时，表示该序列通过了95%、99%置信度的显著性检

验[21-23]。

2 结果与分析

2.1 高温日数的时空变化

从图2可以看出，1980—2020年渭河流域年均高温日数波动较大，但总体呈极显著增加趋势，趋势为0.92 d·(10a)$^{-1}$，表明近40 a来渭河流域高温日数以接近1 d·(10a)$^{-1}$的速度逐渐增加。统计结果发现，渭河流域近40 a来高温日数年平均值为3.54 d，其中，高温日数最多的年份是1997年和2017年，分别为10.3 d和10.8 d，高温日数最少的年份是1983年和1984年，均为0.3 d。将研究时段分为4个时段（1980—1989年、1990—1999年、2000—2009年、2010—2020年），从不同时段来看，高温日数呈逐步增长趋势，4个时段平均高温日数分别为1.71 d、3.52 d、4.03 d和5.24 d。

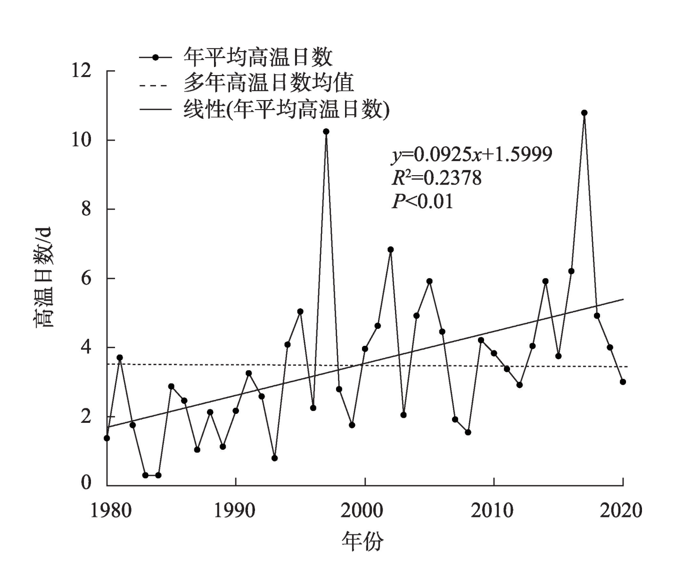
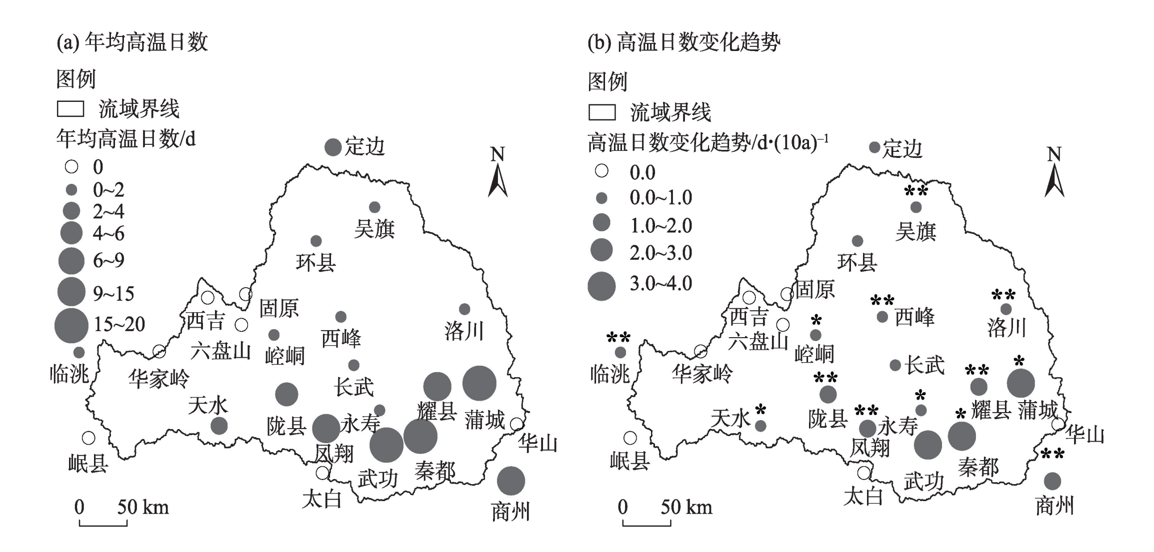


图2 1980—2020年渭河流域年均高温日数的时间变化

Fig. 2 Time changes of the average annual high temperature days in the Weihe River Basin from 1980 to 2020

渭河流域高温日数呈现从西北到东南逐渐递增的态势，其空间分布差异明显，高温日数较大的区域主要分布在渭河流域的东南部（图3a），高温日数超过4 d的有蒲城、陇县、凤翔、武功、耀县、秦都、商州，其中蒲城、武功和秦都的高温日数明显高于其他站点，分别为20.0 d、15.7 d、18.6 d。天水和定边高温日数达2 d及以上，分别为2.2 d和2.0 d，渭河流域其他站点高温日数不足2 d。从高温日数变化趋势的空间分布看（图3b），除华家岭、西吉、六盘山、固原、岷县、太白、华山无高温日数记录的站点外，渭河流域其他站点高温日数都呈增加趋势。其中蒲城、武功、秦都增加趋势都超过了3 d·(10a)$^{-1}$，尤以武功增加趋势最大，达到了4 d·(10a)$^{-1}$。高温日数变化趋势高的站点主要位于渭河流域南部，且临洮、陇县、凤翔、西峰、吴旗、洛川、耀县、商州都通过了0.01显著性检验，天水、崆峒、秦都、蒲城、永寿通过了0.05显著性检验。渭河流域南部站点增加趋势显著，大部分都通过了0.01显著性检验，北部站



注：*表示通过了0.05的显著性检验；**表示通过了0.01显著性检验。下同。

图3 1980—2020年渭河流域各站年均高温日数及其变化趋势的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the average annual high temperature days and its change trend at each stations in the Weihe River Basin from 1980 to 2020

点增加趋势较为显著，基本通过了0.05水平的显著性检验，中部站点增加趋势不显著。

2.2 高温初日和终日变化特征

从图4a可知，渭河流域高温初日多出现在6月下旬，高温初日最早出现在5月上旬，分别在陕西省的定边、蒲城、凤翔和秦都。从渭河流域不同年份高温初日出现的极端情况来看，环县、武功、耀县、商州最早在4月就出现高温，分别在2006年4月30日、2004年4月21日、2006年4月29日和2011年4月29日。就高温初日变化趋势的空间分布而言（图4b），渭河流域除定边、吴旗、环县、耀县呈现推迟趋势外，其他站点高温初日都呈提前趋势。高温初日呈推迟趋势的站点分布于渭河流域北部宁夏自治区境内。其中，临洮、吴旗、西峰、洛川、陇县、凤翔、耀县、商州通过了0.01显著性检验，崆峒、蒲城、天水、永寿、秦都通过了0.05显著性检验，崆峒高温初日提前趋势最大，达到−8.16 d·(10a)$^{-1}$；商州提前趋势最小，为−0.60 d·(10a)$^{-1}$。高温初日的变化趋势无明显空间差异性。

由图5a可知，渭河流域高温终日多出现在9月上旬，但也有部分站点出现在7月下旬，分别是临洮、崆峒、西峰以及长武；但位于渭河流域北部的定边、吴旗、环县高温终日出现在8月。从不同年份高温终日的极端情况来看，高温最晚结束于9月下旬，出现在武功和秦都的2013年9月16日以及商州2013年9月14日。就高温终日变化趋势的空间分

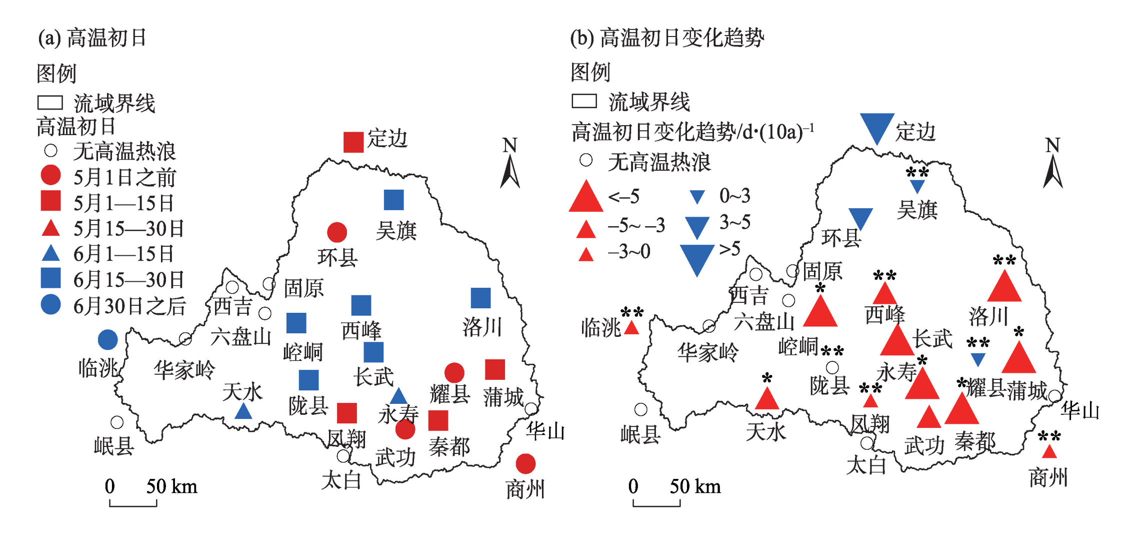


图4 渭河流域高温初日及其变化趋势

Fig. 4 First day of high temperature and its change trend in the Weihe River Basin

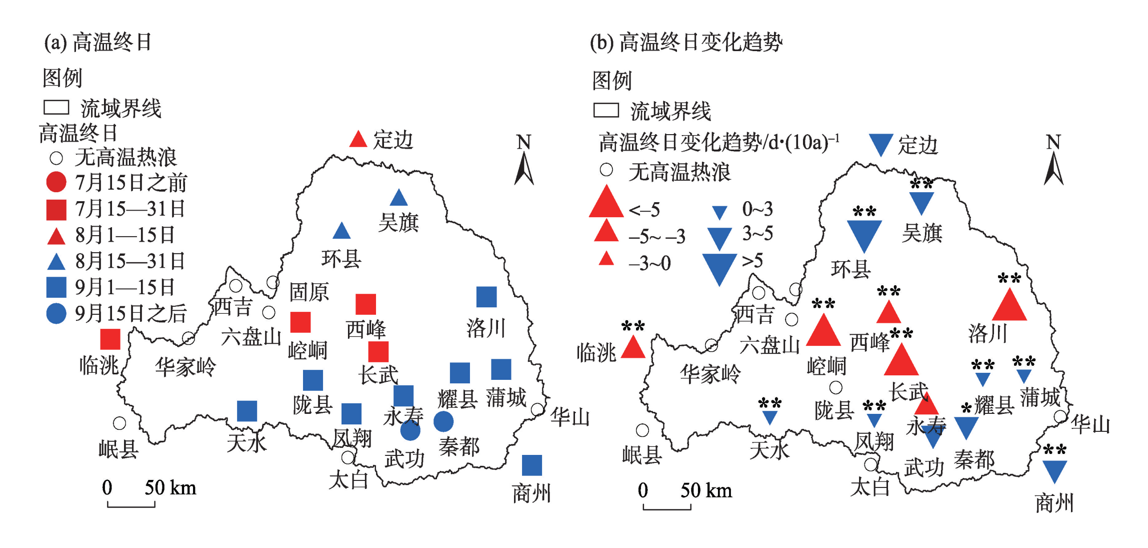


图5 渭河流域高温终日及其变化趋势

Fig. 5 Last day of high temperature and its change trend in the Weihe River Basin

布而言(图5b),渭河流域站点高温终日既有提前也有推迟,高温终日提前的站点主要分布于渭河流域中部地区,分别为临洮、崆峒、西峰、长武、洛川、永寿,其余站点高温终日都呈推迟趋势。其中临洮、吴旗、环县、崆峒、西峰、长武、洛川、蒲城、天水、凤翔、耀县、商州都通过了0.01显著性检验,秦都通过了0.05显著性检验。崆峒和洛川高温终日提前趋势最明显,分别达到了−8.28 d·(10a)$^{-1}$和−8.15 d·(10a)$^{-1}$,都提前超过8 d·(10a)$^{-1}$;环县高温终日推迟趋势最明显,达到了7.99 d·(10a)$^{-1}$,定边、吴旗、武功、秦都、商州高温终日推迟趋势也较为明显,都达到3 d·(10a)$^{-1}$以上。

2.3 高温热浪事件特征

2.3.1 高温热浪等级和频次 统计分析表明,1980—2020年渭河流域24个台站共发生了465次高温热浪事件,其中轻度高温热浪300次,占总高温热浪事件的64.52%;中度高温热浪117次,占总高温热浪事件的25.16%;重度高温热浪48次,占总高温热浪事件的10.32%(表3)。轻度高温热浪占总高温热浪一半以上,由此可以看出,渭河流域更易发生轻度高温热浪,中度高温热浪次之,重度高温热浪发生的最少,但每10次高温热浪事件中至少有1次是重度高温热浪。

各站累计不同等级高温热浪频次的空间分布如图6a~c所示。华家岭、固原、西吉、六盘山、崆峒、岷县、洛川、太白、华山共9个站点无轻度高温热浪,其中蒲城、武功、秦都轻度高温热浪次数最多,分别

表3 1980—2020年渭河流域不同等级高温热浪事件统计

Tab. 3 Statistics of high temperature and heat wave events of different grades in the Weihe River Basin from 1980 to 2020

热浪等级	频次/次	占比/%
轻度高温热浪	300	64.52
中度高温热浪	117	25.16
重度高温热浪	48	10.32
总热浪	465	100.00

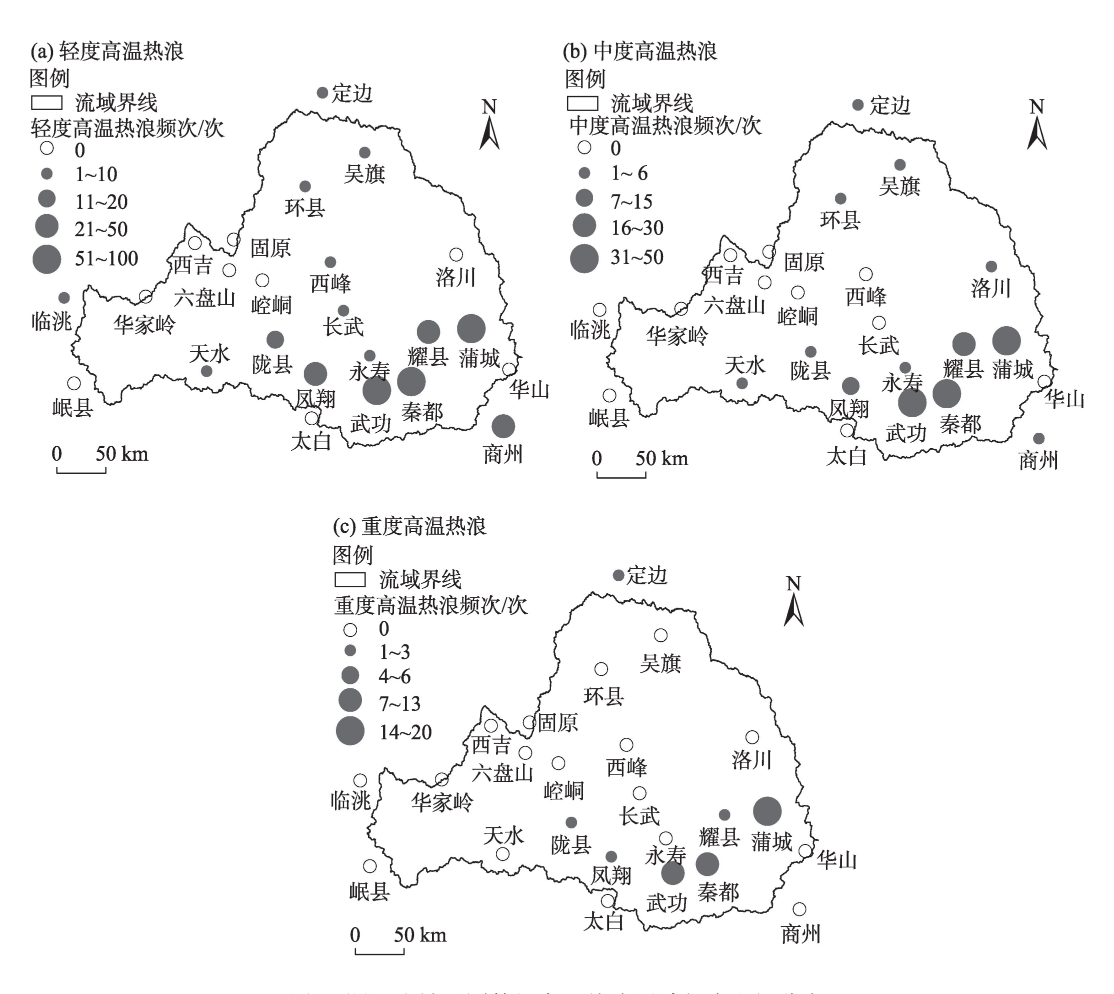


图6 渭河流域不同等级高温热浪累计频次空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of cumulative frequency of different grades of high temperature and heat wave in the Weihe River Basin

为68次、59次、89次；临洮、华家岭、固原、西吉、六盘山、崆峒、西峰、长武、岷县、太白、华山共11个站点无中度高温热浪，比无轻度高温热浪事件站点增加了2个，蒲城、武功、秦都中度高温热浪次数最多，分别为39次、31次、41次；仅定边、蒲城、陇县、凤翔、武功、耀县、秦都7个站点发生重度高温热浪，其余17个站点均无重度高温热浪事件，其中蒲城、武功、秦都重度高温热浪次数最多，分别为20次、11次、13次。可以看出，不同等级高温热浪频次在空间分布上较为一致，轻度、中度、重度高温热浪次数最多的站点均为陕西省的蒲城、武功、秦都。此外，陇县、凤翔、耀县、商州轻度高温热浪和中度高温热浪频次也相对较高，不同等级高温热浪频次较高的站点都位于渭河流域东南部的关中平原。

此外，累计热浪频次最多的站点和轻度、中度、重度高温热浪次数最多的站点一样，也是蒲城、武功、秦都，分别达到113次、143次和95次，与不同等级高温热浪频次空间分布大体一致(图7a)。热浪累计频次除华家岭、固原、西吉、六盘山、崆峒、岷县、太白、华山8个没有发生高温热浪事件的站点外，其余都呈增加趋势(图7b)。其中耀县、秦都通过0.01显著性检验，临洮通过0.05显著性检验。秦都增加趋势最明显，达到0.59次·$(10a)^{-1}$，临洮变化趋势最小，为0.01次·$(10a)^{-1}$。

2.3.2　高温热浪持续时间和强度　从各站点高温热浪平均持续天数来看(图8a)，热浪持续时间较长的

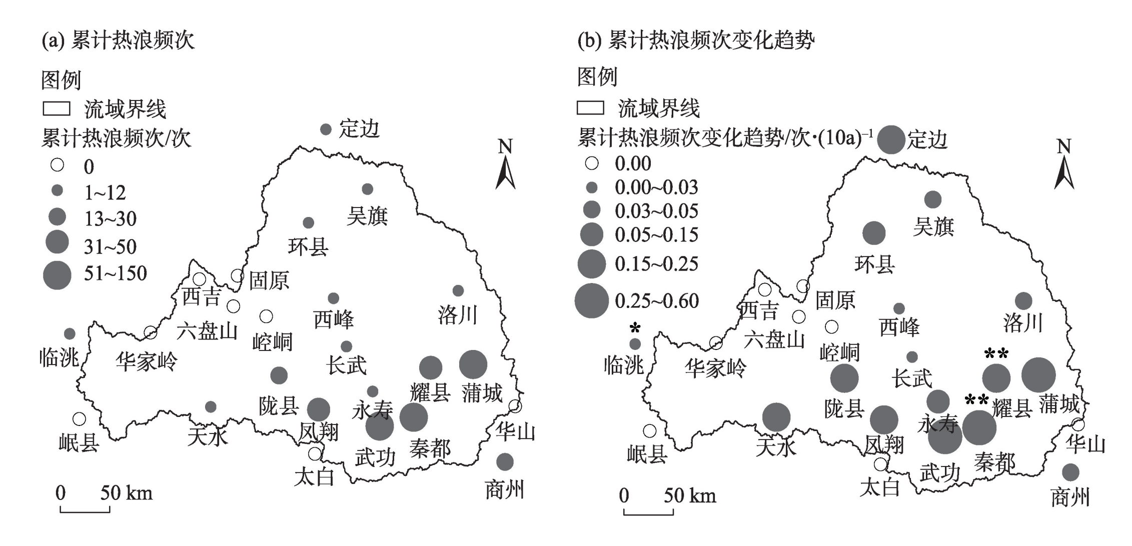


图7　渭河流域各站累计高温热浪频次及其变化趋势的空间分布

Fig. 7　Spatial distributions of cumulative high temperature and heat wave frequency and its change trend at each stations in the Weihe River Basin

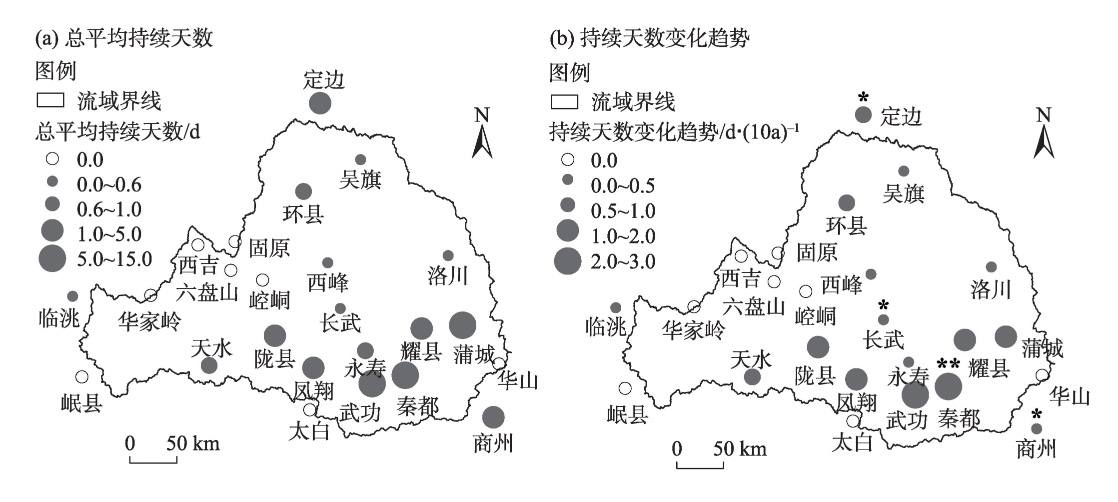


图8　渭河流域各站高温热浪总平均持续天数及其变化趋势的空间分布

Fig. 8　Spatial distributions of the total average duration of high temperature and heat waves and its change trend at each stations in the Weihe River Basin

站点都分布于渭河流域东南部，空间分布具有差异性，且与高温热浪事件发生频次在空间上具有一致性。渭河流域高温热浪总平均持续天数大部分在1~5 d之间，其中蒲城、秦都、武功热浪持续天数最长，都达到10 d以上，分别为12.9 d、12.9 d、10.0 d，与不同等级高温热浪发生次数最多站点具有一致性。陇县、凤翔、耀县和商州热浪持续天数在2 d以上，分别为2.0 d、2.8 d、3.7 d和2.3 d。渭河流域其余各站热浪持续天数都在2 d以下，可以看出热浪持续天数最长的站点均位于渭河流域陕西省内。从趋势上看(图8b)，除未发生高温热浪的站点外其他站点都呈增加趋势，增加天数较多的站点主要分布于渭河流域南部。其中定边、长武、商州通过了0.05显著性检验，秦都通过了0.01显著性检验，武功平均持续天数增多趋势最明显，达到2.8 d·(10a)$^{-1}$。

高温热浪强度可以综合表征持续时间和最高温度信息，利用公式(1)，计算并获取了各站点近40 a来高温热浪强度(图9)。结果发现，渭河流域高温热浪强度的空间差异较明显，强度较高站点主要分布在流域南部，强度基本大于2，北部站点也较高，强度在0.5~1.0之间，仅中部站点高温热浪强度较低，在0.0~0.5之间。其中蒲城、秦都高温热浪强度最高，分别为7.23和6.93。

从不同时段来看(图10)，渭河流域近40 a来高温热浪强度整体呈显著上升趋势，趋势为4.8 d·(10a)$^{-1}$，且1980—1989年增幅最为明显，可以看出1990年之前渭河流域高温热浪强度偏低，1990年后

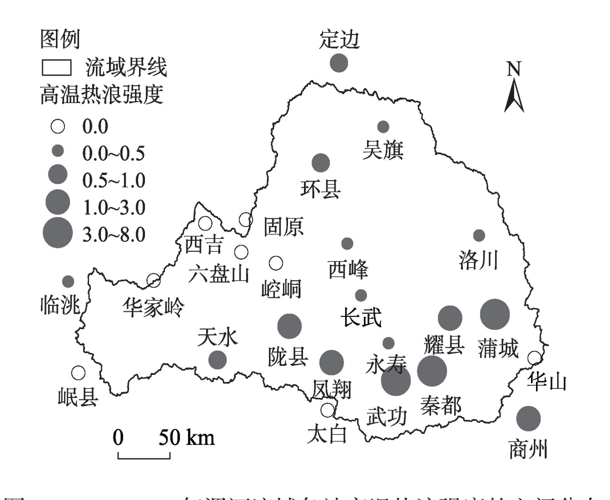


图9 1980—2020年渭河流域各站高温热浪强度的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of high temperature and heat wave intensity at each stations in the Weihe River Basin from 1980 to 2020

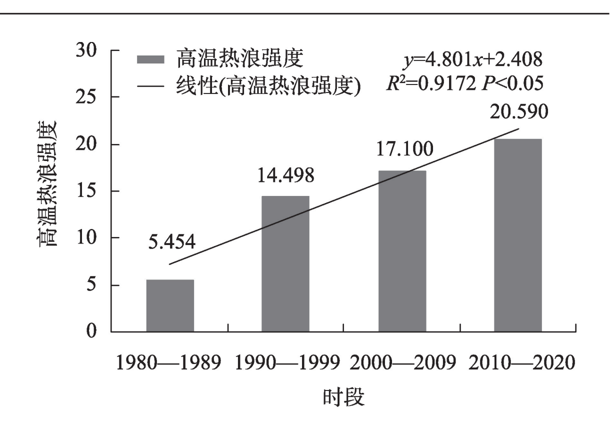


图10 不同年代际渭河流域高温热浪强度

Fig. 10 Intensity of high temperature and heat wave in the Weihe River Basin in different decades

高温热浪强度剧增，这表明随着全球气候变暖的加剧，渭河流域高温热浪强度可能会进一步增强，这会对人类健康、工农业生产等造成严重威胁，需要得到足够的重视。

高温热浪容易对人体健康造成不利影响，许遐祯等[24]发现高温热浪过程造成的人群超额死亡率在20%以上，且对0~5岁的婴幼儿和60~80岁的高龄人群危害较大。刘建军等[25]发现热浪除直接造成人类死亡外，还会加速呼吸系统、消化系统及心血管等疾病的发病进程，渭河流域人口主要集中在东南部的关中盆地(图11)，而人口高密度区域与高温热浪高强度区域在空间上是基本重合的，这严重威胁着流域人口尤其是脆弱性人群的身体健康和生命安全，因此，要重点加强渭河流域高危害性高温热浪的预警与防范。

3 讨论

总体来看，渭河流域大部分区域自20世纪80年代以来，高温日数及高温热浪事件均呈显著增加趋势，同时也存在明显的空间差异性。程肖侠等[26]研究发现近半个世纪以来陕西省高温频次明显增多、强度明显增强，且高温热浪频次呈南多北少、东多西少的分布特征，同时高温初日呈提前趋势，高温终日呈推迟趋势。姬霖等[27]研究发现1960—2017年渭河流域日最高温呈增长趋势，与全球气温变化趋势基本一致，特别是20世纪80年代后上升速率明显加快，这与本研究的结果是基本一致的。

渭河流域高温热浪的空间差异性是由多种因素引起的，首先是地理位置和地形因素，由于渭河

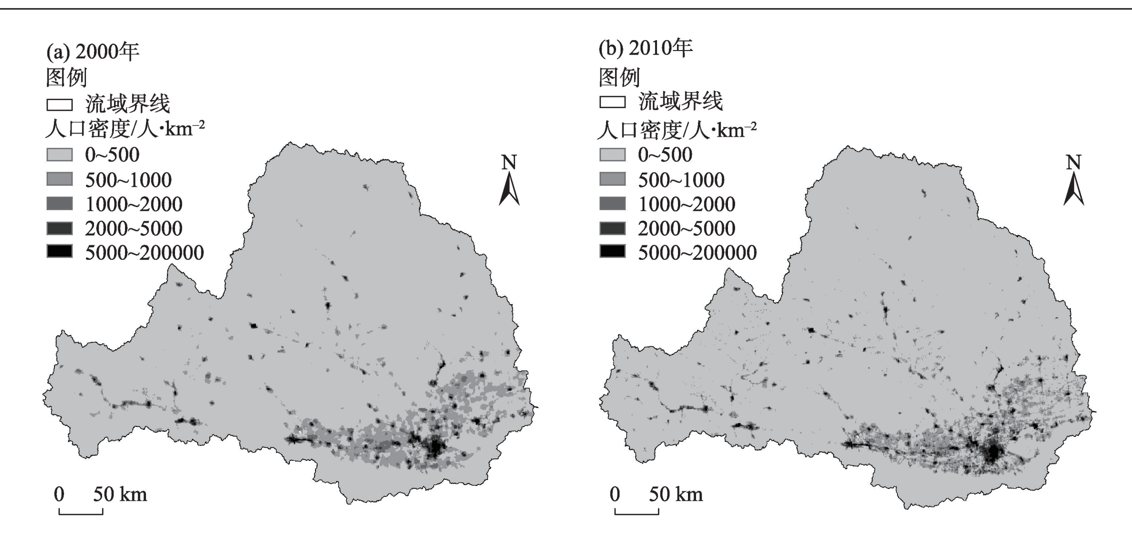


图11 2000、2010年渭河流域人口密度空间分布

Fig. 11 Spatial distributions of population density in Weihe River Basin in 2000 and 2010

流域地势西部高东部低，且南部为秦岭，北部为黄土高原，东南部为关中平原，从结果可以看出，海拔较高的几个站点如太白和华山就没有高温记录；其次是城市热岛效应，相关研究指出20世纪80年代以来随着城市化和工业化速度的加快，城市热岛效应更加显著，且热岛效应影响下的气温变化和中国以及全球气温变化相一致[28]，本研究中高温热浪强度较高的站点集中于关中城市群，城市热岛效应一定程度上加剧了高温热浪。此外，部分研究发现高温热浪的变化与降水日数、年际/年代际尺度的大气环流模式、土壤湿度密切相关[29-31]。本研究还存在一些不足，如研究中高温热浪结果是基于站点数据，区域代表性稍显不足，后期研究中将考虑采用气象栅格数据提高结果可靠性。同时，本研究仅限于高温热浪时空变化特征分析，并未涉及高温热浪发生机理及原因，由高温热浪导致的经济和生态环境等的影响还有待进一步研究。

4 结 论

（1）渭河流域1980—2020年高温日数以接近1 d·(10a)$^{-1}$的速率呈极显著增加趋势，多年平均值为3.54 d，高温日数最多的年份是1997年和2017年，分别为10.3 d和10.8 d。高温日数各站点呈现出从西北到东南逐渐递增的空间分布特征，高值站点主要分布在渭河流域的东南部，其中以关中平原站点高温日数增加趋势最为显著。

（2）高温初日最早时间在4月下旬，高温终日最晚时间在9月上旬，高温初终日时间间隔最长约5.5个月。除无高温数据的站点外，趋势分析表明渭河流域大部分的站点高温初日呈显著性提前，提前天数约3~5 d·(10a)$^{-1}$，接近一半的站点高温终日呈显著性推迟，推迟天数约3 d·(10a)$^{-1}$，这表明渭河流域受到高温影响的总时间变长了。

（3）近40 a来渭河流域轻度、中度和重度高温热浪发生次数占比分别为64.52%、25.16%和10.32%，不同等级高温热浪频次较高的站点都位于流域东南部的关中平原，且与热浪持续时间和高温热浪强度空间特征一致，其中累计热浪频次、热浪持续时间和热浪强度最高的站点都为关中平原的蒲城、武功和秦都，说明关中平原是渭河流域高温热浪的重心。

参考文献(References)

[1] 周波涛. 全球气候变暖: 浅谈从AR5到AR6的认知进展[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 667-671. [Zhou Botao. Global warming: Scientific progress from AR5 to AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 667-671.]

[2] 黄小梅, 仕仁睿, 刘思佳, 等. 西南地区夏季高温热浪时空分布特征及其成因[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(3): 59-65. [Huang Xiaomei, Shi Renrui, Liu Sijia, et al. Spatial-temporal characteristics and causes of summer heat waves in southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2020, 40(3): 59-65.]

[3] Alizadeh M R, Adamowski J, Nikoo M R, et al. A century of observations reveals increasing likelihood of continental-scale compound dry-hot extremes[J]. Science Advances, 2020, 39(6):

eaa24571, doi: 10.11261/sciadv.aa24571.

[4] 张嘉仪, 钱诚. 1960—2018年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(3): 225-239. [Zhang Jiayi, Qian Cheng. Linear trends in occurrence of high temperature and heat waves in China for the 1960—2018 period: Method and analysis results[J]. Climatic and Environmental Research, 2020, 25(3): 225-239.]

[5] Conti S, Meli P, Minelli G, et al. Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy[J]. Igiene E Sanita Pubblica, 2005, 60(3): 121-139.

[6] 何林宴, 简茂球. 广西贵港地区极端高温日的时间变化特征及其环流背景[J]. 热带气象学报, 2019, 35(5): 694-708. [He Linyan, Jian Maoqiu. Temporal variations of extreme heat days in Guigang of Guangxi and related circulation background[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35(5): 694-708.]

[7] 彭京备, 刘舸, 孙淑清. 2013年我国南方持续性高温天气及副热带高压异常维持的成因分析[J]. 大气科学, 2016, 40(5): 897-906. [Peng Jingbei, Liu Ge, Sun Shuqing. An analysis on the formation of the heat wave in southern China and its relation to the anomalous western Pacific subtropical high in the summer of 2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(5): 897-906.]

[8] 安宁, 左志燕. 1961—2017年中国地区热浪的结构变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(8): 1214-1226. [An Ning, Zuo Zhiyan. Changing structures of summertime heatwaves over China during 1961—2017[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(8): 1214-1226.]

[9] 卜凡蕊, 孙鹏, 姚蕊, 等. 淮河流域高温热浪时空演变规律及成因分析[J]. 地理科学, 2021, 41(4): 705-716. [Bu Fanrui, Sun Peng, Yao Rui, et al. High temperature heat waves in the Huaihe River Basin and relation to the Madden-Julian oscillation: Spatio-temporal properties and causes[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(4): 705-716.]

[10] 黄卓, 陈辉, 田华. 高温热浪指标研究[J]. 气象, 2011, 37(3): 345-351. [Huang Zhuo, Chen Hui, Tian Hua. Research on the heat wave index[J]. Meteorology Monthly, 2011, 37(3): 345-351.]

[11] 邢佩, 杨若子, 杜吴鹏, 等. 1961—2017年华北地区高温日数及高温热浪时空变化特征[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1365-1376. [Xing Pei, Yang Ruozi, Du Wupeng, et al. Spatiotemporal variation of high temperature day and heat wave in north China during 1961—2017[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1365-1376.]

[12] 姜荣, 陈亮, 象伟宁. 上海市极端高温天气变化特征[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(1): 66-74. [Jiang Rong, Chen Liang, Xiang Weining. Characteristics of extreme high temperature weather in Shanghai[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32 (1): 66-74.]

[13] 贾佳, 胡泽勇. 中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势[J]. 地球科学进展, 2017, 32(5): 546-559. [Jia Jia, Hu Zeyong. Spatial and temporal features and trend of different level heat waves over China[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(5): 546-559.]

[14] Keellings D, Moradkhani H. Spatiotemporal evolution of heat wave severity and coverage across the United States[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(9): e2020GL087097, doi: 10.1029/2020 GL087097.

[15] 张尚印, 宋艳玲, 张德宽, 等. 华北主要城市夏季高温气候特征及评估方法[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 383-390. [Zhang Shangyin, Song Yanling, Zhang Dekuan, et al. The climate characteristics of high temperature and the assessment methods in the large cities of northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 383-390.]

[16] 杨贵羽, 王浩. 渭河流域粮食生产与灌溉农业发展的相互作用关系分析[J]. 中国水利, 2015(5): 56-59. [Yang Guiyu, Wang Hao. Interaction of grain yield with irrigated agriculture development in Weihe River Basin[J]. China Water Resources, 2015(5): 56-59.]

[17] 袁梦, 畅建霞, 黎云云. 基于综合干旱指数的渭河流域干旱时空分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(5): 401-408. [Yuan Meng, Chang Jianxia, Li Yunyun. Comprehensive evaluation index on temporospatial analysis of drought in Weihe River Basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(5): 401-408.]

[18] 邹磊, 余江游, 夏军, 等. 基于SPEI的渭河流域干旱时空变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 329-338. [Zou Lei, Yu Jiangyou, Xia Jun, et al. Temporal-spatial variation characteristics of drought in the Weihe River Basin based on SPEI[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 329-338.]

[19] 施洪波. 华北地区高温日数的气候特征及变化规律[J]. 地理科学, 2012, 32(7): 866-871. [Shi Hongbo. Climatic characteristics and the spatio-temporal variation of high temperature days in north China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(7): 866-871.]

[20] 邢彩盈, 张京红, 吴胜安. 近50年海南岛高温日数和热浪的气候特征[J]. 中国农学通报, 2017, 33(22): 107-112. [Xing Caiying, Zhang Jinghong, Wu Sheng'an. Climatic characteristics of high temperature days and heatwaves: Hainan Island in recent 50 years[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(22): 107-112.]

[21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 69-71. [Wei Fengying. Modern climate statistics diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 1999: 69-71.]

[22] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.

[23] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990, 25(1): 86-91.

[24] 许遐祯, 郑有飞, 尹继福, 等. 南京市高温热浪特征及其对人体健康的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2815-2820. [Xu Shenzhen, Zheng Youfei, Yin Jifu, et al. Characteristics of high temperature and heat wave in Nanjing City and their impacts on human health[J]. Chinese Journal of Ecological, 2011, 30(12):

2815-2820.]

[25] 刘建军, 郑有飞, 吴荣军. 热浪灾害对人体健康的影响及其方法研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 151-156. [Liu Jianjun, Zheng Youfei, Wu Rongjun. Impacts of heat waves disasters on human health and its research method[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(1): 151-156.]

[26] 程肖侠, 蔡新玲, 李明, 等. 陕西省高温时空变化特征及其定量化评估方法[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 956-965. [Cheng Xiaoxia, Cai Xinling, Li Ming, et al. Temporal-spatial features and quantitative evaluation of high-temperature events in Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 956-965.]

[27] 姬霖, 段克勤. 1960—2017年渭河流域极端气温变化及其对区域增暖的响应[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 466-477. [Ji Lin, Duan Keqin. Variations of extreme temperature and its response on regional warming in the Weihe River Basin during 1960—2017[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(3): 466-477.]

[28] 李国栋, 王乃昂, 张俊华, 等. 兰州市城区夏季热场分布与热岛效应研究[J]. 地理科学, 2008, 28(5): 709-714. [Li Guodong, Wang Nai'ang, Zhang Junhua, et al. Urban thermal field and heat island effect of Lanzhou City in summer[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(5): 709-714.]

[29] Jie Z, Liu Z, Li C. Reduced soil moisture contributes to more intense and more frequent heat waves in northern China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(9): 1197-1207.

[30] Wang P, Tang J, Wang S, et al. Regional heatwaves in China: A cluster analysis[J]. Climate Dynamics, 2017(8): 1-17.

[31] 吴瑞曦, 曾刚, 杨效业, 等. 中国北方盛夏高温日数的年代际变化特征及其与蒙古高原土壤湿度的联系[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(1): 78-87. [Wu Ruixi, Zeng Gang, Yang Xiaoye, et al. Interdecadal variability of mid-summer high temperature days in northern China and its association with soil moisture in Mongolian Plateau[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(1): 78-87.]

Temporal and spatial variation characteristics of high temperature and heat wave in the Weihe River Basin from 1980 to 2020

DENG Tiantian, GENG Guangpo, YANG Rui, ZHANG Bao

(College of Surveying and Mapping Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the 1980 to 2020 daily maximum temperature data of 24 meteorological stations, this study uses the Sen+Mann-Kendall trend analysis method to investigate the spatial-temporal characteristics of high temperature and heat wave in the Weihe River Basin, northwest China in the past 40 years. The multi-year average of the high temperature days in the Weihe River Basin was 3.54 days, showing an extremely significant increase trend at a 1 $d\cdot(10a)^{-1}$ rate. The stations in this basin presented spatial distributions of less in the northwest and more in the southeast. The increasing trend of high temperature days in Guanzhong Plain was the most significant. The first day of high temperature was in late April, while the last day was in early September. The first day at most stations in the Weihe River Basin was significantly advanced by approximately 3-5 $d\cdot(10a)^{-1}$, while the last day of nearly half of the stations was significantly delayed by approximately 3 $d\cdot(10a)^{-1}$. These results indicate that the total time affected by the high temperature in the Weihe River Basin became longer. Next, the occurrence of severe high temperature and heat wave accounted for 10.32%, suggesting that at least one of every 10 incidents was a severe high temperature and heat wave. Stations with a higher frequency and a longer duration of high temperature and heat wave of different levels were distributed in Guanzhong Plain, indicating that the plain was the main part of the high temperature and heat wave in Weihe River Basin. The high temperature and heat wave intensity in different periods showed a significant upward trend as a whole, suggesting that the intensity may increase in the future. However, this will pose a serious threat to human health and to the industrial and agricultural production in the basin, requiring adequate attention from relevant departments. This study could provide a reference for mitigating the high-temperature and heat wave disaster in the Weihe River Basin.

Key words: high temperature and heat wave; trend analysis; temporal and spatial variation; intensity; Weihe River Basin